

平成 26 年 5 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340054

研究課題名(和文)高感度宇宙放射線測定装置による太陽中性子の観測

研究課題名(英文)Observation of solar neutrons by using the very sensitive cosmic ray detector

研究代表者

松原 豊 (Matsubara, Yutaka)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号：80202323

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円、(間接経費) 4,530,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、太陽表面における高エネルギー粒子の加速機構を解明するために、加速された粒子と太陽大気との相互作用で生成される中性子を観測するものです。中性子は太陽と地球の間の磁場の影響を受けないため、加速されたときの情報を保持しているからです。本科研費においては、過去に加速器実験で用いられていた粒子の飛跡を捉えることがリアルタイムで行える検出器を4年間で宇宙線検出器として改良し、メキシコの4,600m高山シエラネグラに設置し、最終年度末には定常的な観測が開始しました。この検出器により、太陽表面で高エネルギー粒子が瞬間的に加速されるのか、時間をかけて加速されるのかが世界で初めてわかります。

研究成果の概要(英文)：We use neutrons to study the acceleration mechanism of high energy ions at the solar surface because they are not affected by the interplanetary magnetic field. These neutrons are produced by the interaction between accelerated ions and the solar atmosphere. During this grant, we succeeded in operating the very sensitive tracking detector which had been used at the accelerator experiment in USA, on Sierra Negra, 4,600m above sea level, in Mexico. The volume of the detector is 3mx3mx1.7m and much more sensitive than the current solar neutron detectors. Moreover we can get the information on the energy of incident neutrons as well as identifying incident particles. The information on the energy of neutron is essential to understand how efficient particles are accelerated at the solar surface, which has not been understood so far. This new detector is also available for monitoring the intensity of galactic cosmic rays.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：太陽中性子 高エネルギー粒子加速機構 高感度宇宙放射線測定装置 銀河宇宙線変動 メキシコ高山

1. 研究開始当初の背景

本研究は、太陽表面における高エネルギー粒子加速機構を、加速された粒子と太陽大気との相互作用で生成される中性子を用いて解明しようとするものである。加速される粒子は電荷を有し太陽-地球間の磁場のために直進できないため、中性子を観測した方が太陽表面での加速機構を探るのに有効である。しかし、中性子の速度はエネルギーによって異なるため太陽中性子検出器は単に中性子を検出するだけではなくて入射中性子のエネルギー情報を得る必要がある。

しかるに、過去の地上での太陽中性子 (>100MeV) 検出器は感度が低くて 10 イベント程度しか検出できていない上に、エネルギー分解能が低くてエネルギー情報が得られたイベントは 1 例しかなく、そのイベントでも太陽表面での中性子のエネルギースペクトルを確定させることはできなかった。これまでの観測では中性子を検出するために、プラスチックシンチレータ中の荷電交換反応で発生する陽子のエネルギー損失に応じた 4 つの異なるエネルギー閾値を設け、閾値を超えたイベントの計数率を調べていた。しかし、これはエネルギーを測っているというのには十分ではなく、さらに検出器の体積も十分に大きくはなく、異なるエネルギーでの計数率を測ることもできていなかったのである。

そこで、名古屋大学太陽地球環境研究所を中心とするグループは、新しい検出器として、細長いシンチレータバーを井桁に組み合わせ、検出器中の粒子の飛跡を各シンチレータバーでのエネルギー損失を測ることによって記録することを考えていた。

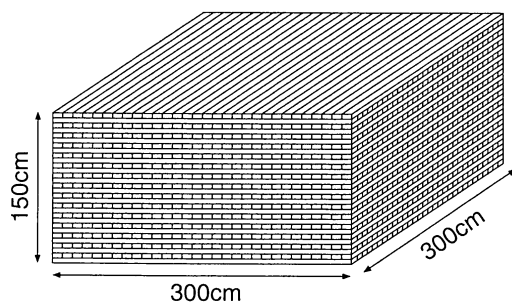


図 1. 名古屋大学で考案した粒子飛跡検出型太陽中性子望遠鏡 (Sako et al 2003)

図 1 に示すシンチレータバーは 2000 本であり、シンチレータバーで得られるエネルギー損失をマルチアノード光電子増倍管で電気信号とする。体積は従来型の検出器と比べて 5 倍以上あるので、検出感度も優れている。

このような検討をしていた時に、KEK と神岡で行われていた K2K 実験の前置検出器である SciBar 検出器が、ビーム方向を太陽方向に見立てると、丁度検討していた検出器に酷似していることがわかった。SciBar 検出器は図 2 に示す構造をしていて、体積は我々がデザインしていたものと同じでシン

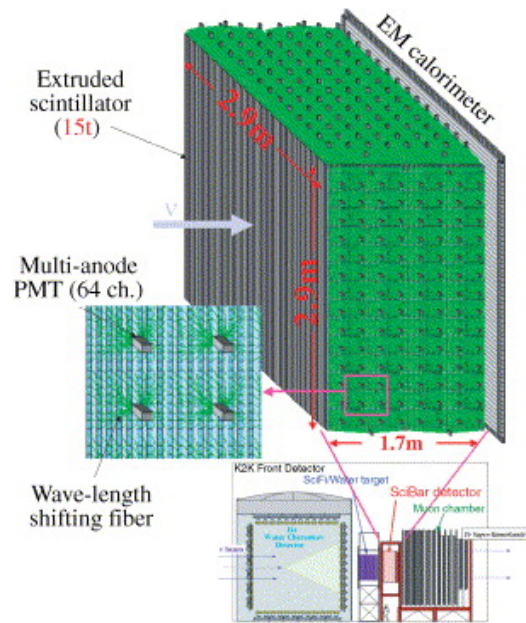


図 2 SciBar 検出器 (Nitta et al. 2004)

チレータバーの数は 14,848 本なのでより精密なものである。SciBar は K2K 実験の後アメリカのフェルミ国立加速器研究所 (FNAL) で SciBooNe 実験として用いられていたが、本科研費の開始前には全ての実験を終了していた。また、SciBar 関係者からは、SciBar 及びエレクトロニクス全てを宇宙線実験に利用することを承諾していただいていた。

肝心の観測場所であるが、中性子は地球大気中で減衰を受けるため、赤道付近の高山が望ましい。そこで検出器の設置場所は、メキシコの 4,600m 高山シエラネグラに決めた。シエラネグラを選んだ根拠は、1) 既に太陽中性子観測を行っており、電力やネットワークが整備されていたこと、2) メキシコ側に強力な研究グループがいて研究協力が受けられること、3) FNAL から陸路で搬送できること、である。またシエラネグラで観測する上で、メキシコの国立研究所 INAOE の許可を得る必要があったが、それも既に得ていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、加速器実験で用いられていた粒子飛跡検出器を高精度宇宙放射線測定装置として転用し、メキシコの 4,600m 高山シエラネグラにおいて宇宙線連続観測を開始することである。その主たる研究目的は太陽表面で加速されたイオンと太陽大気との相互作用で生成される中性子のエネルギースペクトルを世界で初めて測定し、太陽表面における高エネルギー粒子加速機構を解明することにある。また、多方向宇宙線変動もモニターするので、太陽圏における銀河宇宙線の伝播の時間変動、すなわち太陽圏磁場構造の変動を調べることができる。また、15,000 チャンネルもの高精度アクティブ粒子飛跡検出器が 4,600m 高山で稼働するのは世界で初めてのことである。

3. 研究の方法

本研究は以下の順番で進められた。1) SciBar のミニチュアの検出器をセラネグラに設置し、本観測で使用するのと同じ電源系・エレクトロニクスを用いて宇宙線データを取得する、2) FNAL で SciBar の解体を行い、梱包してメキシコ、但し標高 2,150m にある研究所 INAOE (国立天文光学電気研究所) に陸送する、3) INAOE では解体された検出器を宇宙線観測用の架台に収納し、新しい検出器 SciCRT (SciBar Cosmic Ray Telescope) として完成させる、4) SciCRT を用いた宇宙線観測を行い、データ収集プログラムを完成させる、5) SciCRT をセラネグラに設置し、宇宙線連続観測を行う。以下、順番に詳細を述べる。

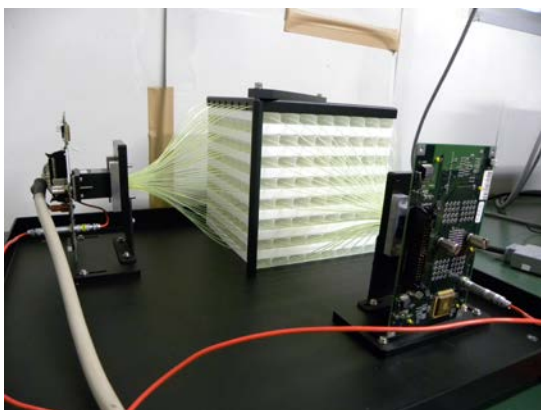


図 3. 試験観測用の mini-SciBar

本科研費が認められる前に、20cm×20cm×20cm のシンチレータバー8×8×2 からなる図 3 のようなシンチレーション検出器を用いて名古屋で様々な試験をしていた。シンチレータバーからの光信号は波長変換ファイバーを通してマルチアノード光電子増倍管 (MAPMT) で電気信号に変換され、図 3 に見えるフロントエンドボード (FB) で処理される。この構成は SciCRT のデータ収集系の最小単位であり、その後のバックエンドボードやトリガーボードも本観測で使用するもので構成してある。この検出器のことを、mini-SciBar と呼んでいる。

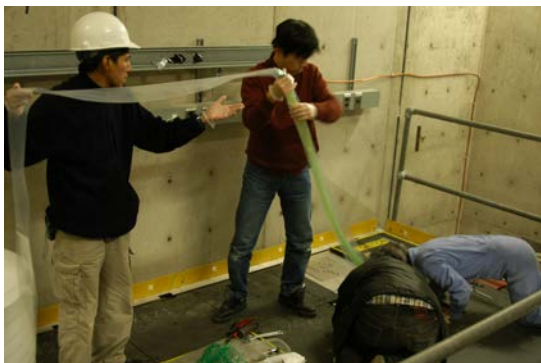


図 4. FNAL でファイバー束を抜いている様子。

平成 22 年度に本科研費が認められると本観測で用いる高電圧電源を購入し、それを用いた最終的な試験をした後、mini-SciBar をメキシコに送った。この目的は、電源系・エレクトロニクスが 4,600m 高山で問題なく動作するか確認することと、取得データとモンテカルロシミュレーションとの比較から、モンテカルロコード、データ収集プログラム双方のデバックをするためである。平成 22 年 10 月からセラネグラで mini-SciBar を稼働させ、長期連続運転を開始した。

セラネグラで mini-SciBar による宇宙線データ取得が行えることを確認した後、平成 23 年 2 月・3 月に FNAL で、SciBar の解体・梱包を行った。2.5cm×1.3cm×3m の各シンチレータバーには 4m の波長変換ファイバーが入っていて、8×8=64 本ずつ束になっている。また、116 枚のシンチレータバーを同じ方向に並べて 1.3cm 厚の平板を作り、もう一枚の板と、バーの長辺が垂直になるように張り合わせたものを最小単位としている (レイヤーと呼ぶ)。従って解体はファイバー束を抜いて木箱に梱包する作業 (図 4) とレイヤーをクレーンで運送用の架台に格納する作業 (図 5) の順で行った。3 月上旬には梱包を終了してメキシコに向けて発送した。

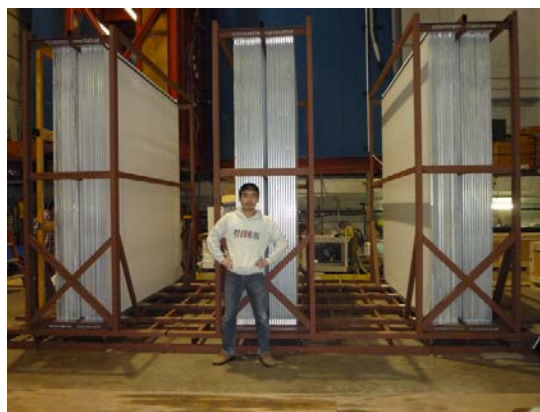


図 5. 運送用の架台に格納された全レイヤー

FNAL を出た荷物は平成 23 年 4 月にメキシコに到着した。加速器実験で用いていた検出器を宇宙線観測に用いる場合には、ビーム方向を太陽方向に置き換える必要がある。それは図 5 の板の姿勢を 90 度倒すことを意味する。1 レイヤーは 300kg あり、全 64 レイヤーでは 15 トンになるのでそのまま重ねるわけにはいかない。8 レイヤーずつ 1 つの架台に入れて (スーパーブロック SB と呼ぶ) 2 トンずつの 8SB から構成することとした。この SB 用の架台を作る作業はメキシコ側が担当し、1 年間の試行錯誤の末に架台の設計に成功した。一方日本側はデータ収集に使用する全 MAPMT, エレクトロニクス, PC 及びデータ取得プログラムの試験を行い、平成 23 年 11 月にはメキシコに輸出した。

平成 24 年度になり、全 SB に対するレイヤーの格納と、ファイバー束のシンチレータバーへの挿入がメキシコの研究者の手で行われ完成した。8 月以降日本・メキシコ両国の研究者の協力で、ファイバー束に対する MAPMT, FB, ケーブルの取り付けとそれ以降のエレクトロニクス、PC の接続が行われた。ケーブルを接続した様子を図 6 に示す。

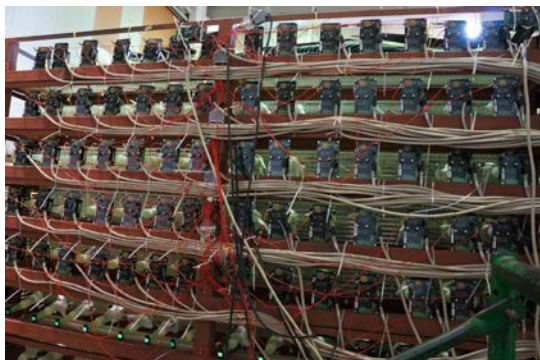


図 6. INAOE でケーブル接続を終えた SciCRT。この後暗幕をかぶせた。

その際、宇宙線の飛跡が予定通り検出できていることを 1SB ごとに確認しながら作業を進めた。最終的には 5SB を用いた宇宙線データを取得ができることまで確認した。現在使用できるエレクトロニクスでは 5 ブロックが最大であり、残りの SB の稼働は今後の課題である。

最終年度である平成 25 年度は 4 月最初から電源・エレクトロニクス・光電子増倍管の梱包を行い、4 月後半から 2SB ずつトラックに積み、INAOE からシェラネグラまでの山道を運搬した。ファイバーは脆弱なものであ



図 7. シェラネグラに設置されたばかりの SciCRT と研究者たち。

るが、4,600m 高山で 8×8 のファイバー束を直径 2.3mm のシンチレータバーの穴に順番を間違えなく入れることは困難なので、今回は外さずに SB の架台に固定して運んだ。一方シェラネグラ山頂にあらかじめ検出器用の建物を用意しておいて格納することも十分な作業スペースがなくて困難なので、建物

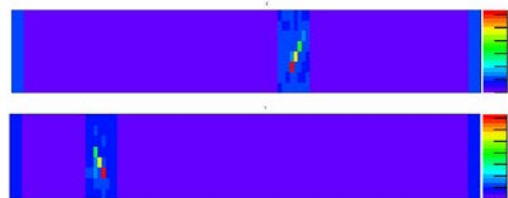


図 8. シェラネグラで取得された中性子様イベントの飛跡。

の土台床だけ作っておき、設置直後に屋根と壁を作るようにした。運搬は 3 日間かけて行われ、現地時間の 4 月 24 日に設置を完了し、建物もすぐに完成した。図 7 に建物も完成した後の検出器と日本側・メキシコ側の研究者を示す。

この後、再度 MAPMT, FEB, ケーブル、それ以降のエレクトロニクス、PC の接続が行われ、平成 25 年 5 月には宇宙線データの取得に成功した。図 8 に 1SB で取得された中性子によると考えられる飛跡を示す。各長方形が 1 本のシンチレータバーの断面、色は相対的なエネルギー損失に対応する。中性子は電荷がないので、シンチレータバー中で陽子に変換されてからエネルギー損失を始めるが、陽子のエネルギー損失は止まる直前に大きくなる。図 8 はそのような飛跡である。

データ収集システムの整備は平成 25 年 9 月には終了した。その後は安定した電力供給のためのハードウェア整備や、エレクトロニクス・PC の温度上昇を防ぐための空気冷却システムの整備がメキシコ側のグループによって継続して行われ、平成 26 年 3 月から高精度宇宙放射線測定装置による宇宙線連続観測が開始した。現在、中性子にバイアスがかかったデータと宇宙線ミュオンにバイアスがかかったデータの二種類を記録している。

4. 研究成果

まず、mini-SciBar を用いた試験観測における一番の成果は宇宙線の軌跡が期待通り取得できたことと、宇宙線によるエネルギー損失量の分布がモンテカルロシミュレーションとほとんど一致していたことである。図 9 は任意抽出の 1 チャンネルでのエネルギー損失分布をデータとモンテカルロと比較したものである。この試験観測は平成 22 年 10

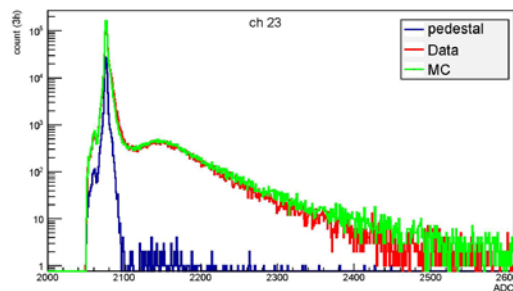


図 9. シェラネグラで得られた宇宙線によるエネルギー損失分布

月から平成 24 年 8 月まで行われたが、この間に太陽活動に伴う磁気嵐によって宇宙線強度が減少するというフォーブッシュ減少を捉えることができた。平成 24 年 3 月 7 日に起こったこの宇宙線減少は、世界の他の検出器でも同じように観測されている。

次に、本高感度宇宙放射線測定装置による成果について述べる。検出器の特性については INAOE における準備観測によって得られている。この観測は、平成 24 年 8 月から平成 25 年 2 月にかけて行われた。中性子による飛跡は検出器内で始まり、通り抜けるような長い飛跡にはなりにくいので、ミュオン (図 10) を用いて検出器の特性が調べられた。

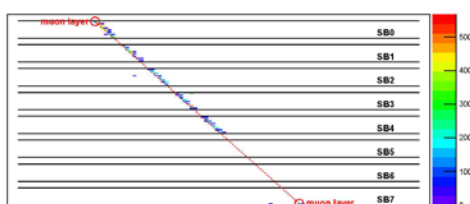


図 10. ミュオンによる粒子飛跡

ミュオンは最上のレイヤーと最下レイヤーの同時通過でデータを取得している。5 時間連続で得られたミュオン頻度は 409.3 ± 0.1 Hz であるのに対し、モンテカルロシ

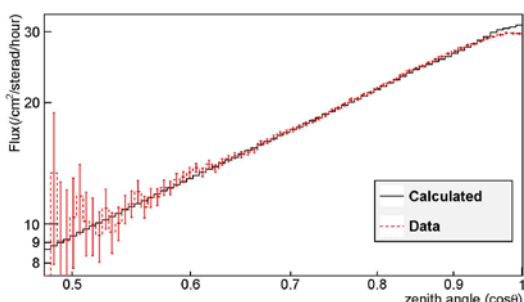


図 11. ミュオンの天頂角分布。

ミュレーションでは 395.2 ± 4.8 Hz となっていてほぼ合っている。また、ミュオンの天頂角分布についてはミュオン観測グループでよく用いられているレスポンス関数 (Murakami et al. 1979) と比較したところ図 11 に示すようによく一致していた。

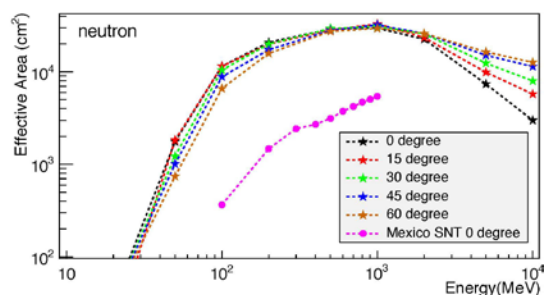


図 12. 中性子に対する有効面積を入射天頂角、エネルギーごとに示したもの。

これまで見てきたようにミュオンについてはデータと計算が一致している。そのほか飛跡のパターンについてもデータとモンテカルロの比較が行われ、よい一致が見られている。従って、モンテカルロシミュレーションは観測結果を再現していると結論づけた。

最後に、このモンテカルロ計算をもとに、中性子に対する検出器の有効面積を図 12 のように計算することができた。シェラネグラで稼働している既存の検出器 (SNT とある) と比べて十分に大きいことがわかる。

SciCRT に対して最も期待されていることはエネルギースペクトルの違いがわかるかどうか、ということである。太陽表面でべき α のスペクトルで放出された中性子がシェラネグラでどのようなスペクトルで観測されるのかを示したものが図 13 である。べき 1

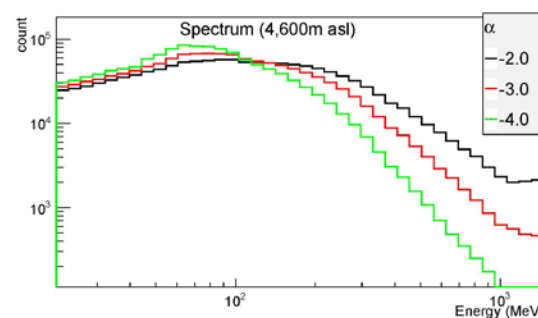


図 13. 太陽表面で中性子がべき α のスペクトルで放出されたときにシェラネグラで観測されるスペクトル。べきを 1 ずつ変えて求めた。

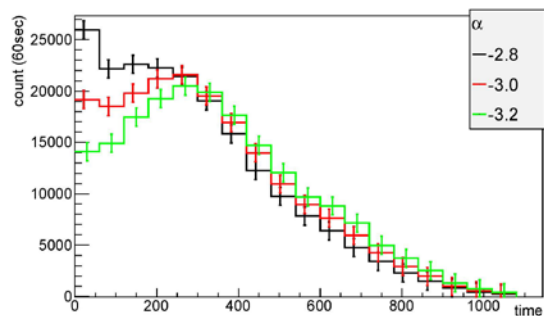


図 14. 太陽表面で瞬間的に放出された中性子の時間分布をスペクトルのべきを 0.2 ずつ変えて求めたもの。

の違いは有意にわかる。また、べき α の違いは中性子の到来時間分布を比較することによってもわかる。図 14 は太陽表面で瞬間的に放出された中性子が地上で観測されるタイムプロファイルを示したもので、べき 0.2 の差でも違いがわかる。太陽表面での粒子加速機構とエネルギースペクトルのべきの関係に着目すると、最も加速効率がよいショック加速と、効率のよくない統計加速とではスペクトルのべきは 1.6 程度異なると期待され

る。従ってべき 0.2 の違いがわかることは非常に重要で、SciCRT の今後の観測により、太陽での高エネルギー粒子加速機構の解明に決定的な情報が得られることが期待される。

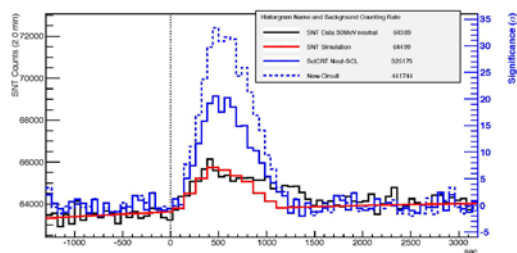


図 15. 2005 年 9 月 7 日にメキシコの既存の検出器で観測された太陽中性子イベントに対する SciCRT の感度。

SciCRT の太陽中性子に対する感度を調べるために、2005 年にメキシコの SNT で検出された太陽中性子イベントを仮定した場合に観測される中性子の時間分布を示したものが図 15 である。黒い時間分布が観測されたもので、これを再現できるモデルはないが最も近いものとして採用したモデルにより SNT で期待されるものが赤線、SciCRT で期待されるものが青い実線である。SciCRT のデータ取得システムには 1 つ問題があり、エネルギー損失に対応する量を読む時間が無視できず、1 イベントのデットタイムは 1msec である。一方で、シェラネグラで期待される中性子のバックグラウンドは 20MHz である。従って現状では多くの中性子を数えていない。

図 15 の結果はデットタイムがあっても既存の検出器よりよいことを示している。また、現在並行して新しい高速読み出しシステムを開発中である。図 15 の青い点線は現在開発中のシステムに置き換えた場合の時間分布で、SNT と比べて信号の量は 3.1 倍になっている。また、図 13、図 14 は、図 15 の青実線に対応する結果なので、データ収集システムが開発中のものに置き換わらなくても、既存の検出器では得られない加速機構に関連する重要な情報が SciCRT によって得られる。

本章で述べた研究成果については平成 25 年 12 月に学術雑誌に投稿され、平成 26 年 4 月に掲載決定となった。また、研究協力者であった永井雄也氏の学位論文としてもまとめられ、名古屋大学大学院理学研究科に提出された。「研究の方法」のところで述べたように、本研究を終了する時期になって、ようやく高精度宇宙放射線測定装置による定常的な太陽中性子観測が始まった。すでに第 24 太陽活動期は平成 26 年 1 月頃黒点数の極大を迎えた。しかしながら、第 23 太陽活動期においては大事な太陽中性子イベントは極大期を過ぎてから起こっている。今後のイベント検出に期待したい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- (1) Nagai, Y., Y. Matsubara, Y. Itow, T. Sako et al., First cosmic-ray measurements by the SciCRT solar neutron experiment in Mexico, *Astropart. Phys.*, 査読有、掲載決定、2014.
- (2) Nagai, Y., Y. Matsubara, Y. Itow, T. Sako et al., The observation of solar neutrons by a new experiment (SciCRT) using a very sensitive cosmic-ray detector, *Proc. 33rd Int. Cosmic Ray Conf.*, Rio de Janeiro, 査読なし、ID392, 2013.

[学会発表] (計 40 件)

- (1) 永井雄也 for the SciCRT collaboration, SciBar 検出器を用いた太陽中性子観測計画 XXII—山頂での連続測定と現状報告、日本物理第 69 回年次大会、東海大学、2014 年 3 月 27 日—30 日
- (2) Nagai, Y., for the SciCRT collaboration, The observation of solar neutrons by a new experiment (SciCRT) using a very sensitive cosmic-ray detector, 33rd Int. Cosmic Ray Conf., Rio de Janeiro, July 2-9, 2013.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/CR/research/res02/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松原 豊 (MATSUBARA, Yutaka)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授
研究者番号：80202323

(2) 研究分担者

伊藤 好孝 (ITOW, Yoshitaka)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授
研究者番号：50272521

(3) 連携研究者

塚 隆志 (SAKO Takashi)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教
研究者番号：90324368